中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 230−238

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160741

傅国海, 杨其长, 刘文科. LED 补光和根区加温对日光温室起垄内嵌式基质栽培甜椒生长及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 230−238

Fu G H, Yang Q C, Liu W K. Effect of LED supplemental lighting and root zone heating on growth and yield of soil ridged substrate-embedded sweet pepper in solar greenhouses in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 230−238

LED 补光和根区加温对日光温室起垄内嵌式基质栽培甜椒生长及产量的影响*

傅国海, 杨其长, 刘文科**

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室 北京 100081)

摘　要: 田间条件下采用起垄内嵌式基质栽培(soil ridged substrate-embedded cultivation, SRSC)方法, 研究了日光温室 LED 冠层补光和电热线根区加温对甜椒生长和产量的影响。该试验设不加温不补光对照(CK)、根区加温 15 ℃处理(T15)、根区加温 18 ℃处理(T18)、单一补光处理(L)、根区加温 15 ℃+补光处理(T15+L)、根区加温 18 ℃+补光处理(T18+L), 共 6 个处理。结果表明, 与对照相比, 根区加温均能提高 SRSC 甜椒根区的温度, 但根区温度仍呈现出随环境温度变化而变化的趋势, T18 的根区全天保持较高温度。根区热通量的变化与根区温度变化相对应, T15 和 T18 处理的根区热通量昼夜变化较 CK 剧烈, 其根区侧面白天向内传热滞后, 晚间侧面向外传热提前, 传递量增加; 根区垂直方向白天向内传热滞后, 传递量减少, 晚间垂直向外传热提前, 但传递量增加。T15 和 T18 均显著提高了甜椒的株高、冠层厚度和冠层直径, 且 T18 比 T15 效果更明显。T15 对甜椒的地上及地下干鲜重没有显著的提升作用, 而 T18 的提升效果显著。根区加温补光处理的甜椒生物量普遍高于单一根区加温或补光处理, 其中 T18+L 处理提升效果显著优于 T15+L 处理。T15、T18 和 L 相对 CK 均提高了甜椒单产, 单产分别提高 30.74%、53.0%和 14.81%。而根区加温和 LED 补光协同作用比单一的根区加温或冠层补光都能表现更好的增产效果, T15+L 和 T18+L 分别比 T15 和 T18 的产量分别提升 32.86%和 15.50%, 分别比 L 产量提升 51.29%和 53.87%。总之, 根区加温与 LED 补光是日光温室甜椒增产有效的调控措施, 两者在增加单株产量上存在显著的协同效应, 二者共同作用比单一作用效果更加明显, 且根区加温对甜椒生长和产量的促进效果比冠层补光更加显著, 在实际生产中具有重要的指导意义。

关键词: 起垄内嵌式基质栽培; 日光温室; 根区加温; LED 补光; 甜椒; 产量

中图分类号: S625.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)02-0230-09

Effect of LED supplemental lighting and root zone heating on growth and yield of soil ridged substrate-embedded sweet pepper in solar greenhouses in China*

FU Guohai, YANG Qichang, LIU Wenke**

(Institute of Environment and Sustainable Agricultural Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to deal with resource and environmental issues of soil cultivation and sunlight deficiency and to enhance

* “十二五”国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2013AA103001)、“十三五”国家重点研发计划项目课题(2016YFD0801001)和山东省重点研发计划(2015GGA07003)资助
** 通讯作者: 刘文科, 主要从事设施园艺营养与光温调控工程方面的研究工作。E-mail: liuwenke@caas.cn
傅国海, 主要从事设施作物根区环控技术方面的研究工作。E-mail: haifengzhisheng@126.com
收稿日期: 2016-08-22　接受日期: 2016-12-05
* Supported by the National High-tech R&D Program of China (863 Program)(2013AA103001), the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0801001) and the Key Research and Development Program of Shandong Province (2015GGA07003)
** Corresponding author, E-mail: liuwenke@caas.cn
Received Aug. 22, 2016; accepted Dec. 5, 2016

root-zone temperature for crop cultivation during low winter temperature periods in solar greenhouses in China, a field study was conducted with soil-ridged substrate-embedded cultivation (SRSC) method under greenhouse conditions to investigate the effect of root-zone heating and LED supplemental lighting on the growth and yield of sweet pepper. Six treatments were designed in the study, including the control without heating and lighting (CK), root zone heating at 15 ℃ (T15), root zone heating at 18 ℃ (T18), sole LED supplemental lighting (L), root zone heating at 15 ℃ plus LED supplemental lighting (T15+L) and root zone heating at 18 ℃ plus LED supplemental lighting (T18+L). The results showed that compared with CK, heating increased the root zone temperature under SRSC and root zone temperature changed with change in temperature of the environment. Root zone temperature under T18 was high throughout the day. Heat flux under T15 and T18 fluctuated with root zone heating and changed more violently than under CK. The data showed a lag in the time of inward heat transfer and an advance in the time of outward heat transfer with increasing root zone temperature in lateral and vertical directions, and there was more diurnal heat transfer in the vertical root zone. T15 and T18 treatments significantly increased plant height, canopy height and diameter of sweet pepper, which were more obvious under T18 than T15 treatments. The growth parameters of sweet pepper further improved with simultaneous root zone heating and LED supplemental lighting. Fresh and dry shoot and root weights of sweet pepper increased significantly under T18 than under T15 treatment. Plant biomass under simultaneous root zone heating and LED supplemental lighting was higher than that under root zone heating or sole LED supplemental lighting, and that under T18+L treatment was highest. Compared with CK, T15, T18 and L treatments improved sweet pepper yield by 30.74%, 53.0% and 14.81%, respectively. Furthermore, sweet pepper yield under T15+L and T18+L were respectively 32.86% and 15.50% higher than that under T15 and T18 and also 51.29% and 53.87% higher than that under L treatment. In summary, root zone heating and LED supplemental lighting proved to be beneficial agronomical soil cultivation measures in solar greenhouse conditions in China with high vegetable productivity and remarkably synergistic effect on single plant yield of sweet pepper. The interaction of root zone heating and LED supplemental lighting was more obvious than that of the single effect of the treatments. Also the effect of root zone heating on the growth and yield of sweet pepper was more obvious than that of LED supplemental lighting. The results of the study provided an important guide in actual crop production under solar greenhouse conditions in China.

Keywords: Soil ridged substrate-embedded cultivation; Solar greenhouse; Root zone heating; LED supplemental lighting; Sweet pepper; Yield

日光温室因其具有良好的蓄热保温和节能高效的性能[1]，在一定程度上解决了我国北方冬季蔬菜生产问题，得到大面积的推广应用[2]。目前，我国日光温室栽培面积已超过 1×10^6 hm^2，约占设施园艺栽培面积的 25%，成为北方地区设施蔬菜生产中最为重要的设施类型[3]。日光温室多以传统的土壤栽培为主，这种栽培方式不仅产量低和连作障碍严重，而且存在诸多生产问题。比如，土壤栽培过程中过量的水肥和农药投入，会导致资源浪费和生态环境污染[4-5]。而且，在冬春季日光温室蔬菜生产中，低温胁迫和光照不足是影响作物生长的重要环境因素[6-7]。日光温室一般无温度调控设备，在冬季极端低温环境下温室内作物光合作用等一系列生理活动受到抑制，导致生长减缓和产量降低[8-9]。研究表明，根区温度对作物生长的影响比空气温度更大[10]。根区温度降低影响根系呼吸、水肥吸收、根系生长及作物移植后存活[11-12]，严重阻碍作物开花结果[13]。光是作物生长发育重要的环境因子，对植物的形态建成、生理代谢、光周期反应、生长发育及果实品质有广泛的调节作用[14-15]。在冬季和早春季节，太阳高度角低，日照时间短，温室弱光造成光合作用减弱和物质合成障碍，最终影响产量和品质[16]。

针对日光温室栽培过程中出现的冬季低温胁迫和土壤栽培带来的低产及一系列环境问题，本课题组以提高晚间日光温室作物根区温度和提升产量为目标，基于土壤栽培根区环境稳定与基质栽培高产的优点提出了一种新的栽培方法——起垄内嵌式基质栽培方法[17](soil ridged substrate-embedded cultivation, SRSC)。前期的研究表明，相对土垄栽培，在早春低温环境下采用起垄内嵌式基质栽培方法进行甜椒栽培，能够提高夜间最低根区温度2.15 ℃，提高甜椒产量50%以上[18-19]。虽然SRSC栽培方法能够有效提高根区温度，但是在应对低温胁迫方面还是有一定的不足。Miao等[20]研究表明，早晨温室空气温度可从12 ℃迅速升高到30 ℃，而根区温度则维持在10 ℃左右，即根区温度的变化相对空气温度具有滞后性。当空气温度适合作物生长时，根区温度胁迫成了抑制根区生理活动和植物生长发育的主要因素[21-23]。此外，根区加温能使作物生长所需温室环境比传统加温条件低5~10 ℃[24]。曲梅等[25]发现，根区加温通过局部调控比空气加温节约能耗28%左右，生产投入较少。因此，通过外源人工根区加温对作物生长

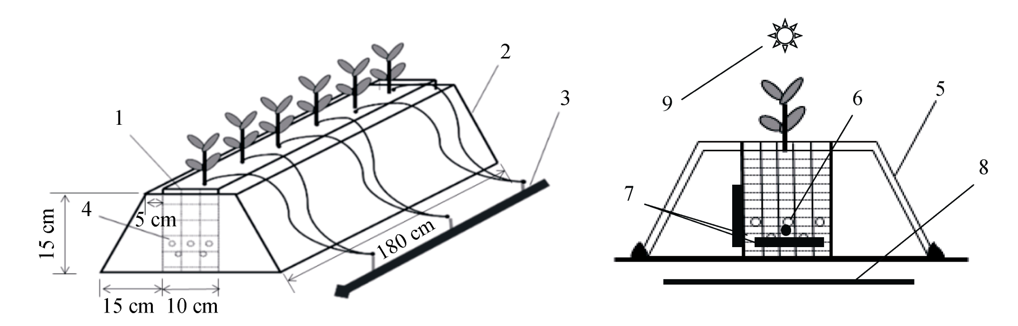
促进和产量提高的效果更加明显且更加节能高效，这对应对冬季低温胁迫具有重要的研究价值，且能够实现农业的可持续发展。

冬季日光温室生产中面临的另一重要问题是弱光寡照。针对设施园艺生产中光照不足的现象，冠层人工补光在设施栽培过程中应用已较为广泛。有研究表明，苗期补光对蔬菜壮苗的形成具有促进作用[26]，对提高作物品质和产量形成有着重要意义。目前，关于日光温室冬春季生产过程中的冬季根区加温与LED人工补光的研究报道较少，协同机制仍不清楚。本研究旨在探究根区加温、冠层补光对甜椒(*Capsicum annuum* L.)苗生长和产量的影响，为日光温室的根区加温和LED补光提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在北京市顺义区大孙各庄镇的日光温室中进行，温室长 60 m，跨度 8 m，脊高 3.8 m。试验小区长 15 m，宽 3 m，小区距温室最南端 1 m，距西侧山墙 4 m。供试作物为甜椒(*Capsicum annuum* L.)，品种为'海丰 16 号'，穴盘育苗，三叶一心时定植，株距 30 cm，行距 90 cm，定植时间为 2015 年 11 月 20 日。试验甜椒栽培采用起垄内嵌式基质栽培方式，即将特别设计的基质栽培槽(铁丝网槽内嵌塑料薄膜，长×宽×高=120 cm×10 cm×15 cm)嵌在一定规格的土垄中，槽内装入按比例混合均匀的栽培基质(草炭∶蛭石∶珍珠岩=1∶1∶1)，外侧土壤培垄完成后，垄表覆盖地膜，完成培垄(横截面为梯形，上底 20 cm，下底 40 cm，高 15 cm)。试验采用全营养液滴灌的方法栽培甜椒。栽培垄根区加温采用地下埋置电热线的方法，电热线规格为 450 W·(30m)$^{-1}$，埋于地下 2 cm 处，埋置好后覆土，其上设置栽培垄，通过控温仪和定时器进行加温时间和温度控制；甜椒幼苗冠层补光采用 LED 植物补光灯(PPFD=200 μmol·m^{-2}·s^{-1}，R∶B=7∶3，光强为实际测得，测定位点为幼苗冠层顶端)，LED 植物补光灯条状布置，悬吊于甜椒幼苗上方，距离冠层 30 cm，与栽培垄走向一致，补光时间通过定时器进行控制。试验装置见图 1。



1: 基质栽培槽; 2: 土壤; 3: 滴灌管; 4: 通气孔; 5: 地膜; 6: 根区温度测点; 7: 根区热通量测点; 8: 电热线位置; 9: LED 补光灯位点。1: substrate groove; 2: soil; 3: drip tube; 4: vent hole; 5: mulching film; 6: temperature measuring point in root zone; 7: heat flux measuring point; 8: position of soil heating line; 9: position of LED supplemental lighting.

图 1 土垄内嵌基质栽培方法栽培垄结构和温度、热通量测点示意图

Fig. 1 Sketch map of soil ridge substrate-embedded cultivation ridge and measuring points of temperature and heat flux

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理，探究根区加温和冠层补光对甜椒幼苗生长的影响。甜椒根区加温设置 15 ℃和 18 ℃两个温度梯度，根区加温时间为 4:00—8:00；甜椒冠层 LED 补光时间为 4:00—8:00，甜椒根区加温与冠层补光时段保持一致。处理 1 为对照栽培垄(CK)，不进行根区加温和冠层补光处理；处理 2 为根区加温 15 ℃处理(T15)；处理 3 为根区加温 18 ℃处理(T18)；处理 4 为冠层补光处理(L)；处理 5 为根区加温 15 ℃和冠层补光处理(T15+L)；处理 6 为根区加温 18 ℃和冠层补光处理(T18+L)。每个处理设置 3 个重复栽培行，每行栽种 6 株甜椒，各处理行自东向西依次排列，各重复行随机排列，栽培过程中各处理水肥管理一致。根区加温和 LED 补光时间为 2015 年 12 月 10 日至 2016 年 2 月 25 日，补光处理与不补光处理隔离，避免干扰。

1.3 收获与测定指标

室外最低气温为–5 ℃左右，日光温室室内气温及甜椒根区温度较低。试验开始后，在甜椒幼苗期进行试验数据采集，开始时间为 2015 年 12 月 10 日。采用国产 YM-CJ 型智能土壤温度记录仪(记录仪精度±0.05 ℃)采集甜椒根区的温度及室内、外空气温度。甜椒根区温度测点位于垄中心位置 10 cm 深处(图 1)，室内温度测点位于试验小区上方 2 m 高处，测点避光；室外温度测点位于室外通风避光处，数据采集时间间隔为 10 min。选定 2015 年 12 月 12—14 日

3 d 的根区温度数据进行分析。采用国产 YM-RT 型土壤热通量采集器采集 SRSC 栽培垄侧面土壤-基质界面及根区中心(10 cm 深)垂直方向的热通量(图 1), 热量向根区内部传递为正值, 反之则为负值, 选定 2016 年 1 月 30 日—2 月 1 日以及 2016 年 2 月 12—14 日两个时间段内的根区侧面及垂直方向的热通量进行分析。2016 年 3 月 20 日甜椒采收时, 测定甜椒幼苗的生长及产量指标, 采用游标卡尺测定茎粗和果实大小, 采用直尺测定甜椒株高和冠层宽度及高度, 采用天平测定甜椒生物量及产量, 产量分两次测定, 分别为 3 月 20 日和 3 月 30 日。

1.4　数据分析

数据采用 Microsoft Excel 软件处理及作图, 并采用 SAS 8.2 软件进行数据分析。

2　结果与分析

2.1　试验期间日光温室内外及根区温度变化规律

试验期间日光温室内外温度分别为 6~30 ℃和 −11~12 ℃。由图 2a 可知, 根区加温阶段室外气温变化范围为−7~8 ℃, 而室内最低气温仅为 8 ℃, 平均温度为 12.7 ℃。由图 2b 可知, 根区加温能够改变根区温度的变化规律。日光温室内根区温度在 15:00 左右达到峰值, 在 10:00 左右达到最低。对照处理的根区温度随时间变化表现出有规律的升高和降低, 一天之中各有 1 个峰值和谷值。根区加温 15 ℃的根区温度变化在后两天表现出不同, 而第 1 天根区温度无明显不同可能是由于根区温度较高, 未达到加温条件, 加热系统未启动。后两天, 根区温度低于设定值加温系统启动, 根区温度在 4:00 开始升高, 7:00 达到峰值后与对照处理一样开始下降, 可能是由于 7:00 之后加温补偿的热量不及散失的热量多, 但是降低了温度下降速度, 且能够相对保持较高的根区温度。根区加温 18 ℃处理根区温度变化较为一致。根区温度在 4:00 开始升高, 表现出先升高后降低的变化规律, 在 9:00 左右达到峰值, 这与加温到 8:00 不一致, 可能是由于储存的热量会继续提高根区温度, 到 9:00 热量已不足以维持散热, 温度开始下降, 但其温度水平较高。

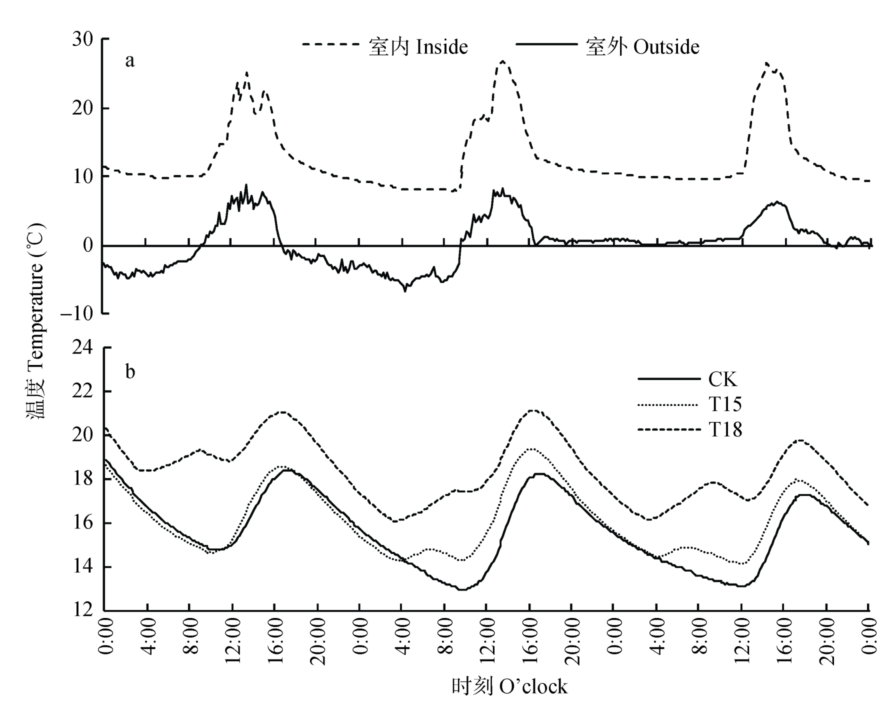


图 2　甜椒根区加温阶段日光温室内、外气温(a)及不同加温条件下甜椒根区温度变化(b)

Fig. 2　Air temperatures inside and outside solar greenhouse during root zone heating period of sweet pepper (a) and changes of root zone temperatures of sweet pepper under different heating conditions (b)

CK: 对照栽培垄, 不进行根区加温和冠层补光处理; T15: 根区加温 15 ℃处理; T18: 根区加温 18 ℃处理。CK: the control without heating and lighting; T15: root zone heating for 15 ℃; T18: root zone heating for 18 ℃.

2.2　单独根区加温条件下甜椒根区水平与垂直热通量变化规律

由图 3a 可知, 对照与两种加温条件下甜椒根区侧面热通量变化不同。选取第 3 天晴天时的数据进行分析。根据热通量板的放置方向, 正值表示热量向内传递, 负值表示热量向外传递。根据曲线的变化趋势可知, 白天热量向内传递, 夜晚热量向外传递, 且三者表现出一定的规律性。随着根区加温梯度

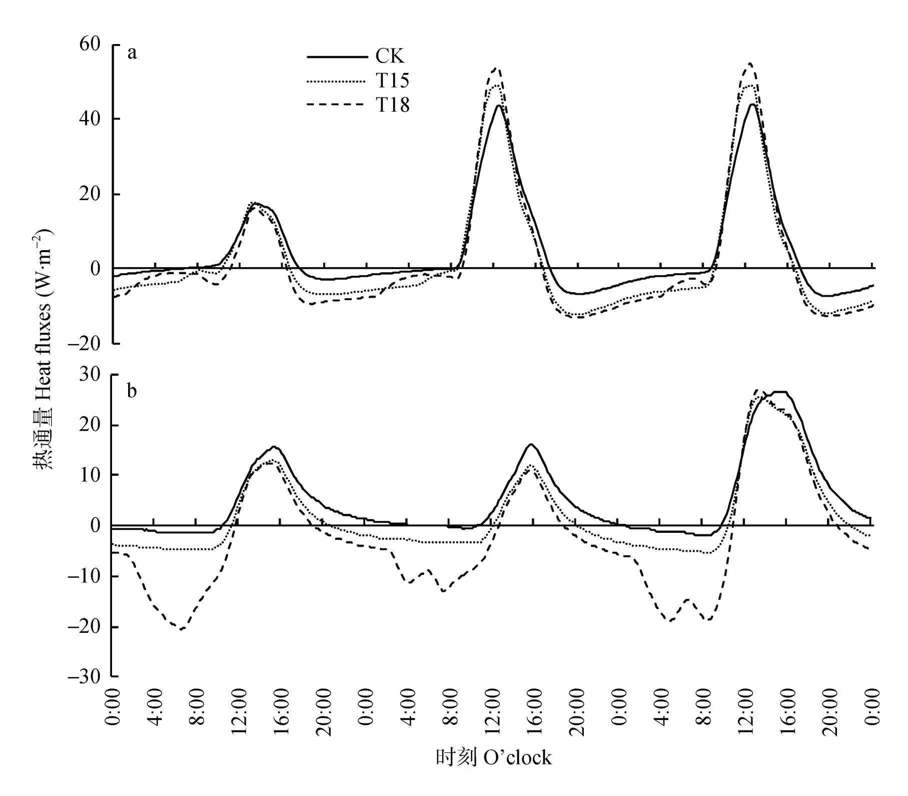


图 3 不同加温条件下甜椒根区侧面(a)和垂直方向(b)热通量变化

Fig. 3 Changes of heat fluxes of lateral (a) and vertical (b) root zones of sweet pepper under different heating conditions

CK: 对照栽培垄, 不进行根区加温和冠层补光处理; T15: 根区加温 15 ℃处理; T18: 根区加温 18 ℃处理。CK: the control without heating and lighting; T15: root zone heating for 15 ℃; T18: root zone heating for 18 ℃.

的升高, 各处理的根区温度与外界温差逐渐增加, 白天根区侧面向内部传递的最大热通量递增, 传递越剧烈, 分别是 43.9 $W·m^{-2}$、49.1 $W·m^{-2}$和 54.9 $W·m^{-2}$, 而夜间由于气温快速降低, 各处理向外侧传递的最大热通量也递增, 分别是 7.2 $W·m^{-2}$、11.8 $W·m^{-2}$和 12.6 $W·m^{-2}$, 这与根区不同加温梯度导致的根区温度与外界环境温差有关。

由图 3b 可知, 对照与两种加温条件下甜椒根区垂直方向的热通量变化不同。根据热通量板的放置方向, 正值表示热量向内传递, 负值表示热量向外传递。选取第 3 天晴天的数据进行分析。随着根区加温梯度的升高, 白天向根区内部传递最大热通量差异较小, 但根区加温处理提前达到峰值, 比不加温处理提前 2 h, 而夜间向外传递的最大热通量随着加温梯度的升高递增, 但相差较小。随着根区加温梯度的提高, 根区侧面垂直方向的热量传递表现出较为一致的规律, 根区早晨外部开始向内传热的时间逐渐滞后, 而晚上基质开始向外侧土壤传热的时间逐渐提前, 这可能是由于栽培垄蓄积的热量不同于气温变化造成的。其中, 随着根区加温梯度的提高, 根区侧面白天和夜间的传热量增加, 而根区垂直方向的白天传热量减少, 夜间的传热量增加。

2.3 根区加温和 LED 补光对甜椒生长指标的影响

由表 1 可知, 不同加温补光处理下, 甜椒的形态指标表现出差异。根区加温 15 ℃和 18 ℃均提高了甜椒的株高、茎粗、冠层高度和冠层直径, 其中甜椒的株高、冠层厚度和冠层直径提高显著(冠层厚度是指甜椒冠部分枝的厚度, 冠层直径指冠部分枝的直径, 这两个指标表征地上部光合作用部分的形态), 且根区加温 18 ℃比 15 ℃效果更明显, 除茎粗外, 根区加温 18 ℃甜椒指标显著高于加温 15 ℃。单一冠层补光处理的甜椒株高和冠层直径得到显著提高, 但茎粗和冠层厚度提升不显著。在根区加温的基础上进行冠层补光处理会进一步提高甜椒的形态指标, 两种根区加温方式下甜椒的冠层直径均显著提高。同时, 根区加温 18 ℃条件下补光, 还会显著提高株高和冠层厚度。相比之下, 根区加温对甜椒生长的影响比冠层补光更加显著。

不同根区加温和冠层补光条件下甜椒的生物量出现差异, 能够增加甜椒地上及地下的生物量。根区加温 15 ℃对甜椒地上及地下干、鲜重无显著提升作用, 而根区加温 18 ℃的提升效果显著。单一的冠层补光对甜椒地上干重和地下鲜重的提高效果显著, 这可能是由于物质运输失衡引起的。根区加温和冠层补光协同处理的甜椒生物量普遍高于单一根区加

表 1　不同加温补光条件下甜椒的形态和生物量指标(n=6)
Table 1　Morphological parameters of sweet pepper under different heating and lighting conditions

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	冠层厚度 Canopy thickness (cm)	冠层直径 Canopy diameter (cm)	地上鲜重 Fresh shoot weight (g)	地上干重 Dry shoot weight (g)	根系鲜重 Fresh root weight (g)	根系干重 Dry root weight (g)
CK	72.50±0.98e	9.87±0.37c	32.50±2.08c	31.75±0.96d	313.33±12.58c	40.71±4.04d	29.76±1.29d	5.06±0.46c
T15	77.63±0.94c	10.43±0.40bc	35.25±2.78b	36.00±0.91c	329.67±11.06bc	42.19±3.28cd	32.59±1.37cd	5.56±0.43c
T18	81.13±0.86b	11.41±0.56a	37.00±2.45b	38.00±0.82b	349.33±12.10b	49.49±2.70b	36.19±1.18b	7.71±0.26ab
L	75.13±0.74d	9.97±0.69c	32.25±2.63c	36.75±0.96bc	319.67±14.80c	45.41±3.71bc	34.66±2.12bc	5.95±0.53c
T15+L	79.00±0.82c	10.91±0.28ab	37.13±2.02b	37.50±0.91b	333.33±15.28bc	50.08±4.02b	36.80±2.17b	7.17±0.72b
T18+L	86.13±0.92a	11.49±0.40a	40.00±3.16a	39.75±0.50a	388.33±12.58a	57.25±2.35a	42.72±1.72a	8.41±0.32a

CK: 对照栽培垄，不进行根区加温和冠层补光处理; T15: 根区加温 15 ℃处理; T18: 根区加温 18 ℃处理; L: 冠层补光处理; T15+L: 根区加温 15 ℃和冠层补光处理; T18+L: 根区加温 18 ℃和冠层补光处理。小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。CK: the control without heating and lighting; T15: root zone heating for 15 ℃; T18: root zone heating for 18 ℃; L: sole LED supplemental lighting; T15+L: root zone heating for 15 ℃ + LED supplemental lighting; T18+L: root zone heating for 18 ℃ + LED supplemental lighting. Lowercases indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

温处理，其中根区加温 18 ℃处理提升效果显著优于加温 15 ℃处理。

2.4　根区加温和 LED 补光对甜椒产量的影响

由表 2 可知，根区加温和冠层补光均能提高甜椒的产量。根区加温 15 ℃和 18 ℃处理的果实大小、果实数量、单果重等指标未显著提高，但单株产量得到显著提升，且根区加温 18 ℃比加温 15 ℃显著提高了单株产量。T15 和 T18 处理的甜椒单产分别比 CK 提高 30.74%和 53.00%。单一冠层补光对产量指标均无显著提升作用，单产量比 CK 提升 14.81%。在根区加温的基础上进行冠层补光会进一步提升甜椒的产量指标。根区加温和冠层补光协同作用比单一的根区加温或冠层补光都能表现更好的增产效果。根区加温和冠层补光协同作用能够比单一根区加温处理更加显著的地提高产量。其中 T15+L 相对于 T15 的增产效果要比 T18+L 相对于 T18 的增产效果更优，在果实数量和单果重上表现显著。T15+L 和 T18+L 处理比单一加温条件下的产量分别提升 32.86%和 15.50%，分别比 L 处理的甜椒产量提升 51.29%和 53.87%，而 T18+L 比 T15+L 的产量提升 1.7%，增产效果不明显。

表 2　不同加温补光条件下的甜椒产量指标(n=6)
Table 2　Yield parameters of sweet pepper under different heating and lighting conditions

处理 Treatment	果实直径 Fruit diameter (mm)	果实长度 Fruit length (mm)	果实数量 Fruit number	单果重 Single fruit weight (g)	单株产量 Single plant yield ($g \cdot plant^{-1}$)	单产 Yield ($kg \cdot m^{-2}$)
CK	88.68±2.81b	75.69±3.78a	2.80±0.84c	119.15±10.09a	332.82±99.33d	2.70
T15	91.26±3.19ab	81.53±5.03a	3.60±1.52bc	131.48±14.18a	468.66±82.71bc	3.53
T18	91.83±3.14ab	77.59±3.59a	4.20±0.45abc	136.74±13.49a	573.30±69.99ab	4.13
L	90.73±2.31ab	78.85±5.18a	3.20±1.10c	131.40±13.31a	409.28±78.75cd	3.10
T15+L	94.06±2.14a	77.39±4.06a	5.20±1.10a	121.80±11.76a	633.04±88.32a	4.69
T18+L	93.33±3.64a	79.38±5.26a	5.00±0.71ab	131.05±15.03a	649.02±63.53a	4.77

CK: 对照栽培垄，不进行根区加温和冠层补光处理; T15: 根区加温 15 ℃处理; T18: 根区加温 18 ℃处理; L: 冠层补光处理; T15+L: 根区加温 15 ℃和冠层补光处理; T18+L: 根区加温 18 ℃和冠层补光处理。小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。CK: the control without heating and lighting; T15: root zone heating for 15 ℃; T18: root zone heating for 18 ℃; L: sole LED supplemental lighting; T15+L: root zone heating for 15 ℃ + LED supplemental lighting; T18+L: root zone heating for 18 ℃ + LED supplemental lighting. Lowercases indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

3　结论与讨论

日光温室SRSC栽培的甜椒具有高产潜力，但受控于低温弱光逆境危害，造成减产。本试验结果表明，气温较低的环境条件下，根区加温和LED补红蓝光能够促进日光温室SRSC栽培甜椒的生长并增加其产量，说明在冬季日光温室SRSC方法应用生产过程中，根区加温和LED补光能够进一步提升其生产性能。

SRSC根区加温能够改变甜椒根区的温热变化规律，且较高的根区加温温度对根区温度和热通量变化影响较大。研究发现，冬季日光温室环境最低温出现在6:00左右，而土壤或栽培垄的温度变化相对环境温度的变化具有滞后性[18,27]。温室空气温度在早晨可以迅速升高，但是根区温度升温慢，此时，低根区温度是寒冷季节影响植物生长和生理活动的关键环境因素[23]。我们选择在根区温度较低的4:00—

8:00进行根区加温，在最为有效的时间内加温实现节能和高效。可以发现，根区加温18 ℃造成根区温度全天都高于对照，这可能是由于加温时段蓄积了较多的热量，而根区加温15 ℃提升了低温时段的根区温度和白天升温阶段的根区温度，提升幅度弱于根区加温18 ℃处理，说明其根区没有蓄积太多的热量。同时发现，在加温阶段两种处理根区温度都有一个降低过程，这可能是由于当环境温度出现极低温时，影响根区温度的变化，引起根区温度相对较大幅度的下降，当白天升温开始时，根区温度又恢复上升趋势。由于根区温度的变化与热量有着密切的关系，直接受热量的影响，但是由于栽培垄侧面土壤和垂直方向基质的传热速率不同，造成不同加温处理白天和夜间两个部位传热散热的时间不同。根区早晨外部开始向内传热的时间逐渐滞后，而晚上基质开始向外侧土壤传热的时间逐渐提前，这可能是由于栽培垄温度较高，而早晨和夜间室内气温降低较快，造成了热平衡出现时间的差异。其中，随着根区加温梯度的提高，根区内部热量较高，而气温变化较为剧烈，加温处理需向内和向外传递更多的热量才能达到热量平衡。而垂直方向白天向内传递热量较少可能是由于基质的传热速率较快造成的，栽培垄内外没有形成明显的温度差。

SRSC根区加温和冠层补光都能影响甜椒的生长。根区加温通过改变根区环境温度来影响根系和冠层的一系列生理活动进而影响作物的生长[28-29]。研究表明，低温条件下根区加温能够促进根系呼吸，提高根系代谢活力及其对水分和养分的吸收[30-31]。此外，根区加温还能促进冠层的光合作用，有利于物质的转运[32]。作物冠层补光有利于光合作用的进行。冬季日照时间缩短，光照不足，会影响作物的光合作用，进而影响干物质的形成，减少产量[33]。通过人工补光能够有效增加光照，促进作物光合作用。与温室低温环境中的根区加温效果一样，选择在揭开保温被前4 h进行补光，使作物提前进行光合作用，与根区加温共同作用，效果比单一根区加温或冠层补光好，进一步促进了作物生长。可以发现，根区加温效果比冠层补光效果更好，对生长和产量的影响更显著。

SRSC 根区加温和冠层补光能够增加作物产量。这说明在 SRSC 基础上进行根区加温和冠层补光对产量的提升是有效的，即根区加温和冠层补光促进了作物生长，能够增加干物质的积累，进而增加作物产量。根区加温时段的冠层补光，一方面根区加温促进了甜椒根系的养分吸收，提高了低温环境下甜椒冠层的光合能力，另一方面补光增长了光合作用时间，促进了甜椒的生长发育。此外，有研究表明，根区加温调控根区局部，比冠层加温更加节能[25]，且由于作物对根区温度的反应更加敏感，根区加温更加节能高效[34]。因此选择根区加温是较为高效的作物调节方式。本研究表明，随着根区加温梯度的提升，产量逐渐升高。而根区加温配合冠层补光处理甜椒产量高于单一根区加温或冠层补光处理，且根区加温比冠层补光效果好，但是根区加温 18 ℃+LED 补充的产量仅比根区加温 15 ℃+LED 补光高1.7%，在增加耗能的基础上，产量并没有得到较大的提升。因此从最终的经济效益考虑，选择根区加温 15 ℃和冠层补光效果最优。

参考文献 References

[1] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 131–138
Li T L. Current situation and prospects of greenhouse industry development in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(2): 131–138

[2] 秦巧燕, 贾陈忠, 曲东, 等. 我国设施农业发展现状及施肥特点[J]. 湖北农学院学报, 2002, 22(4): 373–376
Qin Q Y, Jia C Z, Qu D, et al. Advances and characters of fertilizer application of protected field agriculture in China[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2002, 22(4): 373–376

[3] 陈青云. 日光温室的实践与理论[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 343–350
Chen Q Y. Progress of practice and theory in sunlight greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2008, 26(5): 343–350

[4] 殷永娴, 刘鸿雁. 设施栽培下土壤中硝化、反硝化作用的研究[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 246–250
Yin Y X, Liu H Y. Investigation on nitrification and denitrification of soil under installing cultivation conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(3): 246–250

[5] 李东坡, 武志杰, 梁成华. 设施土壤生态环境特点与调控[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 192–197
Li D P, Wu Z J, Liang C H. Characteristics and regulation of greenhouse soil environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 192–197

[6] Malcolm P J, Holford P, Barchia I, et al. High and low root zone temperatures at bud-break reduce growth and influence dry matter partitioning in peach rootstocks[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 171: 83–90

[7] 孙治强, 张强, 张惠梅. 低温弱光对番茄叶绿素含量变化的影响[J]. 华北农学报, 2005, 20(1): 82–85
Sun Z Q, Zhang Q, Zhang H M. Effect of low temperature and poor light on chlorophyll content of tomato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2005, 20(1): 82–85

[8] 刘玉凤, 李天来, 焦晓赤. 短期夜间亚低温及恢复对番茄

光合作用和蔗糖代谢的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(4): 683–691
Liu Y F, Li T L, Jiao X C. Effects of short-term sub-low night temperature treatment and recovery on the photosynthesis and sucrose-metabolizing of tomato leaves[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(4): 683–691

[9] 胡文海, 喻景权. 低温弱光对番茄植株生长发育及生理功能的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 55–57
Hu W H, Yu J Q. Effects of low temperature and low light on the growth, development and physiological functions of tomato plants[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 55–57

[10] Tahir I S A, Nakata N, Yamaguehi T, et al. Influence of high shoot and root-zone temperatures on growth of three wheat genotypes during early vegetative stages[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008, 194(2): 141–151

[11] Martínez F, Lazo Y O, Fernández-Galiano J M, et al. Root respiration and associated costs in deciduous and evergreen species of *Quercus*[J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(10): 1271–1278

[12] Kaufmann M R. Leaf water stress in Engelmann spruce: Influence of the root and shoot environments[J]. Plant Physiology, 1975, 56(6): 841–844

[13] 闫秋艳, 段增强, 李汛, 等. 根区温度对黄瓜生长和土壤养分利用的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 752–760
Yan Q Y, Duan Z Q, Li X, et al. Effect of root zone temperature on growth of cucumber and nutrient utilization in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4): 752–760

[14] 颉建明, 郁继华, 黄高宝, 等. 持续低温弱光及之后光强对辣椒幼苗光抑制的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 231–234
Xie J M, Yu J H, Huang G B, et al. Effects of light intensity on photoinhibition in pepper seedlings treated under low temperature and poor irradiance[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 231–234

[15] 郝东川, 司雨. LED 灯对设施栽培瓜果类蔬菜产量的影响[J]. 长江蔬菜, 2012(18): 58–60
Hao D C, Si Y. Effects of led lights on yield of melon and fruit vegetables in protected cultivation[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2012(18): 58–60

[16] 程瑞锋. 外源补光解决温室黄瓜早衰问题的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004
Cheng R F. Study on artificial light to solve the problem of greenhouse cucumber senescence[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2004

[17] 傅国海, 刘文科. 日光温室 4 种起垄覆膜方式对甜椒幼苗生长的影响[J]. 农业工程, 2015, 5(4): 67–70
Fu G H, Liu W K. Effects of four kinds of film covering cultivation ridges on growth of sweet pepper seedlings in Chinese solar greenhouse[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(4): 67–70

[18] 傅国海, 刘文科. 日光温室甜椒起垄内嵌式基质栽培根区温度日变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 47–55
Fu G H, Liu W K. Diurnal change in root zone temperature of soil ridge substrate-embedded cultivation method for sweet pepper in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(1): 47–55

[19] 傅国海, 刘文科. 土垄内嵌基质栽培方式对日光温室春甜椒的降温增产效应[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 199–205
Fu G H, Liu W K. Effects on cooling down and increasing yield of sweet pepper of a novel cultivation method: Soil ridge substrate-embedded in Chinese solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(2): 199–205

[20] Miao M, Zhang Z, Xu X, et al. Different mechanisms to obtain higher fruit growth rate in two cold-tolerant cucumber (*Cucumis sativus* L.) lines under low night temperature[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 119(4): 357–361

[21] Ambebe T F, Dang Q L, Li J L. Low soil temperature inhibits the effect of high nutrient supply on photosynthetic response to elevated carbon dioxide concentration in white birch seedlings[J]. Tree Physiology, 2010, 30(2): 234–243

[22] Nxawe S, Laubscher C P, Ndakidemi P A. Effect of regulated irrigation water temperature on hydroponics production of spinach (*Spinacia oleracea* L.)[J]. Journal of Agricultural Research, 2009, 4(12): 1442–1446

[23] Yan Q Y, Duan Z Q, Mao J D, et al. Low root zone temperature limits nutrient effects on cucumber seedling growth and induces adversity physiological response[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(8): 1450–1460

[24] 陈祎. 植物根区加热降低温室能源消耗[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2008(3): 20
Chen W. Plant root zone heating to reduce energy consumption of greenhouse[J]. Agriculture Engineering Technology (Greenhouse Horticulture), 2008(3): 20

[25] 曲梅, 马承伟, 李树海, 等. 地面加热系统温室热环境测定与经济分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 180–183
Qu M, Ma C W, Li S H, et al. Analysis of thermal environment of greenhouse with floor heating system[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 180–183

[26] 崔瑾, 马志虎, 徐志刚, 等. 不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2009, 36(5): 663–670
Cui J, Ma Z H, Xu Z G, et al. Effects of supplemental lighting with different light qualities on growth and physiological characteristics of cucumber, pepper and tomato seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(5): 663–670

[27] 李胜利, 王谦, 孙治强. 巨型竹木塑料大棚及温度性能研究[J]. 农机化研究, 2007(8): 106–108
Li S L, Wang Q, Sun Z Q. Study on the temperature of wide-span plastic covered tunnel greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(8): 106–108

[28] Kurets V K, Drozdov S N, Popov E G, et al. Effect of thermoperiod on net photosynthesis and night respiration of cucumber plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 1999, 46(2): 163–167

[29] Apostol K G, Jacobs D F, Wilson B C, et al. Growth, gas exchange, and root respiration of *Quercus rubra* seedlings exposed to low root zone temperatures in solution culture[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 253(1/3): 89–96

[30] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a

strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998, 396(6711): 570–572
[31] Awal M A, Ikeda T, Itoh R. The effect of soil temperature on source-sink economy in peanut (*Arachis hypogaea*)[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50(1): 41–50
[32] Zhou R, Quebedeaux B. Changes in photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature apple leaves in response to whole b plant source-sink manipulation[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2003, 128(1): 113–119
[33] 王绍辉, 孔云, 程继鸿, 等. 补充单色光对日光温室黄瓜光合特性及光合产物分配的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 203–206
Wang S H, Kong Y, Cheng J H, et al. Effects of supplied light on photosynthetic characteristics and translocation of ^{14}C-assimilates of cucumber growing under solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 203–206
[34] 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2258–2264
Song M L, Wen X Z, Li Y L. Effects of high rhizosphere temperature on plant growth and metabolism: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(11): 2258–2264